

DOI: 10.5846/stxb201408061569

赵宏瑾, 朱仲元, 王喜喜, 宋小园, 王辉, 焦玮. 不同生育期榆树净光合速率对生态因子和生理因子的响应. 生态学报, 2016, 36(6): - .

Zhao H J, Zhu Z Y, Wang X X, Song X Y, Wang H, Jiao W. Effect of ecological factors and physiological factors on the net photosynthetic rate of *Ulmus pumila* at various growth stages. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): - .

不同生育期榆树净光合速率对生态因子和生理因子的响应

赵宏瑾¹, 朱仲元^{1,*}, 王喜喜^{1,2}, 宋小园¹, 王 辉¹, 焦 玮¹

1 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018

2 美国弗吉尼亚州欧道明大学土木与环境工程系, 诺福克 23529-0241

摘要: 利用 Li-6400 便携式光合作用系统, 观测了内蒙古浑善达克沙地榆树 (*Ulmus pumila*) 的净光合速率 (P_n)、上表皮气孔导度 (G_s-u)、下表皮气孔导度 (G_s-l) 等生理因子及大气温度 (T_a)、光合有效辐射 (PAR)、大气二氧化碳浓度 (C_a) 和空气相对湿度 (RH) 等生态因子, 应用相关分析、通径分析、决策系数分析及灰色关联分析, 系统的研究了榆树 P_n 在不同生育期的日变化特征及其与生态因子和生理因子间的关系, 为深入揭示其生理特征及浑善达克沙地榆树规范化种植提供理论依据。研究表明: ①榆树 P_n 日变化在各生育期均呈双峰型曲线, 表现出不同程度的光合“午休”。②榆树 P_n 在各生育期大小顺序为 8 月 > 7 月 > 9 月, 其值分别为 $8.18 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $7.92 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $6.52 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。③7、8、9 月份 PAR、 G_s-u 与榆树 P_n 呈显著正相关, 且 PAR 的直接作用和决策系数均最大, G_s-u 的直接作用大于其他因子的间接作用, 且决策系数仅次于 PAR, 其他因子在各生育期也表现出对榆树 P_n 不同程度的影响。④不同生育期榆树对各生态因子和生理因子的响应有所不同, 7 月份 T_a 为 P_n 主要限制变量, 8 月份 RH 为 P_n 主要限制变量, 9 月份各因子均起增进作用。⑤不同生育期榆树 P_n 的变化主要受 PAR 和 G_s-u 的影响, 但不存在简单的线性相关关系, 是所有因子综合影响的结果。

关键词: 生态因子和生理因子; 灰色关联分析; 净光合速率; 通径分析; 榆树

Effect of ecological factors and physiological factors on the net photosynthetic rate of *Ulmus pumila* at various growth stages

ZHAO Hongjin¹, ZHU Zhongyuan^{1,*}, WANG Xixi^{1,2}, SONG Xiaoyuan¹, WANG Hui¹, JIAO Wei¹

1 Inner Mongolia Agricultural University, Water Conservancy and Civil Engineering College, Hohhot 010018, China

2 Department of Civil and Environmental Engineering Old Dominion University, Norfolk, Virginia 23529-0241, USA

Abstract: This study measured physiological factors of *Ulmus pumila*, namely the net photosynthetic rate (P_n), upper epidermis stomatal conductance (G_s-u), and lower epidermis stomatal conductance (G_s-l), in Otinday Sandland ($42^\circ 23' \text{ N}$, $115^\circ 37' \text{ W}$) of Inner Mongolia using Li-6400 portable photosynthesis system. Ecological factors, namely the atmospheric temperature (T_a), photosynthetically active radiation (PAR), concentration of carbon dioxide in the atmosphere (C_a), and relative humidity of the air (RH) were also examined. Based on the measured data, the relationship between P_n diurnal variation in *U. pumila* at various growth periods and ecological factors and physiological factors was assessed using correlation analysis, path analysis, decision coefficient analysis, and grey correlation analysis. This knowledge is essential to reveal the physiological characteristics and formulate generalizations regarding the cultivation of *U. pumila* in Otinday Sandland. Regardless of growth period, P_n exhibited bimodal diurnal variation with varying degrees of photosynthesis

基金项目: 国家自然科学基金 (51149006); 内蒙古自治区自然科学基金 (2013MS0607)

收稿日期: 2014-08-06; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nmgzzy@tom.com

“midnaps.” P_n was highest in August ($8.18 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), lowest in September ($6.52 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), and intermediate in July ($7.92 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). In the three months from July to September, P_n was found to have significant positive correlations with PAR , which had the greatest direct influence and thus the largest decision coefficient, and G_s-u , which had the greatest indirect influence but a smaller decision coefficient than PAR . The other factors exhibited varying degrees of influence on P_n . The relative influence of ecological factors and physiological factors on P_n depended on the growth period. T_a and RH were the main controlling factors in July and August, respectively, and all factors had positive contributions. Although P_n was mainly influenced by PAR and G_s-u , regardless of growth period, a simple linear functional correlation was not found owing to interactive effects.

Key Words: ecological factors and physiological factors; grey correlation analysis; net photosynthetic rate; path analysis; *Ulmus pumila*

浑善达克沙地是我国北方荒漠化较为严重地区之一^[1],位于京津地区的西北部,是京津地区的风源、沙源和水源区^[2]。长期以来由于气候变化和不合理的人为利用,沙漠化现象非常严重,这不仅制约了当地经济的发展,而且对周边地区人民的生产和生态安全造成了越来越严重的危害^[3]。天然榆树(*Ulmus pumila*)疏林是浑善达克沙地主要的植被形态,占沙地面积的 35.8%,其根系发达,具有抗干旱、抗严寒、抗贫瘠以及寿命长等优点,是干旱区营造防护林理想的树种,也是一种很好的固沙树种^[4]。光合速率是植物生理代谢的基本过程,是植物产量构成的主要因素^[5],它与气孔导度、光合有效辐射、二氧化碳浓度等生态因子和生理因子存在密切的关系。研究天然榆树净光合速率与生态因子和生理因子的关系可以为榆树优质高产栽培提供科学依据。

前人的众多研究多局限于对榆树的群落结构、物种组成的调查和对系统的恢复、更新、演替的宏观分析以及人为干扰对榆树疏林的影响。如刘振^[6]对浑善达克沙地榆树疏林幼苗更新空间格局进行了研究,牛海亮^[7]分析了浑善达克沙地榆树疏林榆树种群特征,李永庚^[8]研究了人为干扰对浑善达克沙地榆树疏林的影响,刘利^[9]等分析了松嫩草原榆树疏林对不同干扰的响应,而对榆树净光合速率与生态因子和生理因子的关系研究的甚少。因此,本文在前人研究的基础上,以短时间尺度观测到的气象数据、植物生理数据,对天然榆树的净光合速率与生态因子和生理因子的关系进行相关性分析、通径分析、决策系数分析及灰色关联分析,以期深入揭示其生理特征及榆树规范化种植提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于浑善达克沙地锡林郭勒盟南部正蓝旗桑根达来镇境内(北纬 $42^{\circ}23'$,东经 $115^{\circ}37'$),地处高原,南高北低,属沙漠地带,地带性土壤主要以栗钙土为主,非地带性土壤以风沙土为主,高程为 1247.5m。该区属中温带半干旱大陆性气候,多年平均气温为 2.3°C ,日最高温度为 36.1°C ,日最低温度为 -38.4°C ;多年平均降雨量为 358.3mm,降雨量年内分配不均,大部分集中在夏季;日照较长,光能充足,多年平均日照时数为 3010h;多年平均气压为 87.7kpa;多年平均风速为 3.5m/s;多年平均相对湿度为 60%;无霜期为 105 天。

1.2 试验材料

榆树(*Ulmus pumila*)为供试材料,多分布于平沙地上,群落组成比较单一,榆树为样地内主要的乔木树种,多以单株散生或以疏林形式分布,长势良好。榆树平均树高为 6m,胸径约 30cm。林下主要分布灌木和牧草群落,灌木主要为黄柳、小叶锦鸡儿等,牧草群落主要为大针茅等。

榆树在不同月份的生育特征为:7 月份,榆树长势较旺,叶片大多展开,叶面积不断增大,植被覆盖度增长较快,蒸腾量增加;8 月份,随着榆树生长发育,叶片完全展开,叶面积指数越来越接近 3,达到有效全部覆盖,蒸腾量越来越大并达到最高峰;9 月末榆树叶开始老化、变黄、衰老、部分叶片开始脱落。不同月份榆树上、

下表皮气孔导度大小顺序均于净光合速率相一致,为 8 月>7 月>9 月。

1.3 研究方法

于 2014 年 7 月、8 月和 9 月采用美国 Li-COR 公司生产的便携式光合作用系统 Li-6400,在自然条件下测定榆树叶片的净光合速率(P_n , $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、上表皮气孔导度(G_s-u , $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、下表皮气孔导度(G_s-l , $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)等生理因子,及空气温度(T_a , $^{\circ}\text{C}$)、光合有效辐射(PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、 CO_2 浓度(C_a , ppm)和空气相对湿度(RH, %)等生态因子。叶片上、下表皮气孔导度的测定方法为:将叶片放入叶室中,使叶片上表皮朝着叶室透明玻璃一面,并朝着太阳光照射的方向,观测的气孔导度即为上表皮气孔导度;同理,使叶片下表皮朝着叶室透明玻璃一面,并朝着太阳光照射的方向,观测的气孔导度即为下表皮气孔导度。测试次数为 7 月份观测 9 天,8、9 月份各观测 7 天,每天观测时间为 8:00—18:00,每隔一小时测定一次。每次试验做 3 次样本重复,每个重复中测定 3 个叶片,分别挂上统一编号的标牌以便定株定位观测,每片正反面各观测 3 次。

本文对观测的数据进行了相关分析、通径分析、决策系数分析及灰色关联分析。

通径分析是在多元回归的基础上将相关系数分解为直接通径系数和间接通径系数^[10],通径系数能有效的表示相关变量间自变量对因变量的直接影响和间接影响效应,从而区分自变量的相对重要性。

决策系数是通径分析中的决策指标,用它可以把各自变量对响应变量的综合作用进行排序,确定主要决策变量和限制变量^[11]。

决策系数的计算公式如下:

$$R_{(i)}^2 = 2P_i r_{iy} - P_i^2$$

式中: $R_{(i)}^2$ —自变量 i 的决策系数; P_i —自变量 i 的直接通径系数; r_{iy} —自变量 i 与因变量 y 的相关系数。决策系数最大的为主要决策变量,而决策系数小且为负值的为主要限制变量^[12]。

灰色关联分析是以各因素的样本数据为依据用灰色关联度来描述因素间关系的强弱、大小和次序的。它通过确定参考序列和若干比较序列几何形状的相似程度,判断灰色过程发展态势的关联程度。

设 $X_1, X_2, \dots, X_N$ 为 N 个因素,反映各因素变化特征的数据列分别为 $\{X_1(t)\}, \{X_2(t)\}, \dots, \{X_M(t)\}$, $t=1, 2, \dots, M$ 。因素 X_j 对 X_i 的关联系数定义为:

$$\xi_{ij}(t) = \frac{\Delta_{\min} + k\Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(t) + k\Delta_{\max}} \quad t=1, 2, 3, \dots, M$$

式中: $\xi_{ij}(t)$ 为因素 X_j 对 X_i 在 t 时刻的关联系数; $\Delta_{ij}(t) = |X_i(t) - X_j(t)|$, $\Delta_{\max}$ 、 $\Delta_{\min}$ 分别表示 $\Delta_{ij}(t)$ 的最大值和最小值; k 为介于 $[0, 1]$ 区间上的灰数(分辨系数)。

在实际运用中, X_j 对 X_i 的关联度近似计算公式为^[13]:

$$r_{ij} \approx \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M \xi_{ij}(t)$$

对求得的灰色关联度从大到小排序,关联度越大表明该因子对被影响因子的影响越大。

1.4 数据处理

试验数据均采用各指标的平均值。对所取得的数据应用 SPSS 17.0 进行相关分析与通径分析,并应用 DPS 2000 软件进行了生态因子和生理因子与榆树光合速率之间灰色关联分析。

2 结果与分析

2.1 不同生育期榆树净光合速率日变化

图 1 表明,3 个月份榆树 P_n (净光合速率)均呈双峰型曲线,7、8 月份第一个峰值均出现在 9:00, P_n 分别为 $10.95 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $13.66 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 9 月份第一个峰值出现在 11:00, P_n 为 $8.78 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。第一个峰值过后,随着光合有效辐射增强,气温不断升高,高温、强辐射造成气孔部分关闭,气孔导度降低,避免了大量的水分损失,同时气孔部分关闭使 CO_2 吸收量减少,导致光合速率也降低。之后随着光合有效辐射的

减弱、气温的降低,气孔导度也随即增大,榆树叶片中 CO_2 吸收量增加,光合速率也增加,因此出现第二个峰值。7、8 月份第二个峰值均出现在 13:00, P_n 分别为 $9.3 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $11.71 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 9 月份出现在 16:00, P_n 为 $7.88 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。第二个峰值之后光合有效辐射减弱,但此时气温仍然较高,空气相对湿度较低,随之气孔导度下降,导致光合速率下降。8 月份榆树 P_n 最大为 $8.18 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; 7 月份次之,为 $7.92 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; 9 月份最小,为 $6.52 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

2.2 榆树净光合速率与生态因子和生理因子的相关性分析

不同生育期榆树 P_n 与生态因子和生理因子间的相关性分析见表 1。由表 1 可以看出: 7 月份榆树 P_n 的变化与 PAR(光合有效辐射)、 G_s-u (上表皮气孔导度)、 G_s-l (下表皮气孔导度)和 RH (空气相对湿度)关系非常密切,其中与 PAR、 G_s-u 和 G_s-l 在 0.01 水平上呈显著正相关,与 RH 在 0.05 水平上呈显著正相关。8 月份榆树 P_n 的变化与 PAR、 T_a 、 G_s-u 和 G_s-l 均在 0.01 水平上呈显著正相关,与 C_a 和 RH 相关性不显著。9 月份榆树 P_n 与 PAR 和 G_s-u 在 0.01 水平上呈显著正相关,与 RH 在 0.01 水平上呈显著负相关,与 T_a 在 0.05 水平上呈显著正相关,与 C_a 和 G_s-l 相关性较弱。

表 1 不同生育期榆树净光合速率与生态因子和生理因子的相关关系

Table 1 Correlative coefficients between net photosynthetic rate of *Ulmus pumila* and ecological factors and physiological factors at various growth periods

月份 Month		光合有效 辐射 (PAR) Photosynthetically active radiation	空气温度 (T_a) Atmospheric temperature	二氧化碳 浓度 (C_a) Concentration of carbon dioxide	上表皮气孔 导度 (G_s-u) Upper epidermis stomatal conductance	下表皮气孔 导度 (G_s-l) Lower epidermis stomatal conductance	空气相对 湿度 (RH) Relative humidity of the air
7 月 July	P_n	0.600 **	-0.028	-0.023	0.599 **	0.596 **	0.251 *
8 月 August	P_n	0.740 **	0.283 **	0.023	0.522 **	0.473 **	0.043
9 月 September	P_n	0.684 **	0.574 *	0.254	0.404 **	0.358	-0.471 **

** .表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。* .表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.3 榆树净光合速率与生态因子和生理因子的通径分析及决策系数分析

2.3.1 通径分析

不同生育期榆树净光合速率与生态因子和生理因子间的通径系数计算结果见表 2。由表 2 可知, 7 月份各生态因子和生理因子对榆树 P_n 的直接作用中, PAR 的直接作用为 0.594, 大于其他因子的直接作用, 同时大于通过其他因子的间接作用, 说明 PAR 对 P_n 有较大的促进作用; G_s-u 和 RH 对榆树 P_n 的直接通径系数分别为 0.388、0.284, 均大于通过其他因子的间接通径系数, 说明 G_s-u 和 RH 对榆树 P_n 的直接影响大于通过其他因子的间接影响; T_a 对 P_n 的直接作用为正值(0.123), 但在各因子相互影响的综合作用下, T_a 与 P_n 的相关系数发生了较大变化, 说明各生态因子和生理因子对 P_n 作用的复杂性。 T_a 和 C_a 对榆树 P_n 的直接作用小于通过 PAR 的间接作用, 因此 T_a 和 C_a 主要通过 PAR 的间接作用来影响榆树的 P_n ; G_s-l 对榆树 P_n 的直接作用小于通过 G_s-u 的间接作用, 因此 G_s-l 主要通过 G_s-u 的间接作用影响榆树的 P_n 。

8、9 月份, PAR 对 P_n 的直接通径系数均为较大正值(分别为 0.687、0.557), 说明不同生育期 PAR 对 P_n 均有较大的促进作用。8 月份 PAR、 C_a 、 G_s-u 和 RH 是通过本身对榆树的 P_n 进行作用, 而 T_a 是通过 PAR 对 P_n 进行作用, G_s-l 主要通过 PAR 和 G_s-u 对 P_n 进行作用。9 月份 PAR、 C_a 和 G_s-u 主要通过本身对榆树的 P_n 进行作

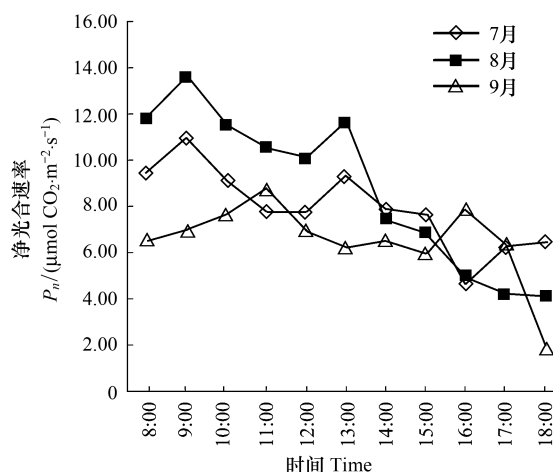


图 1 不同生育期榆树净光合速率日变化

Fig. 1 Diurnal changes of net photosynthetic rate of *Ulmus pumila* at various growth periods

用,而 T_a 主要通过 PAR 对 P_n 进行作用, G_s-l 主要通过 G_s-u 和 PAR 对 P_n 进行作用, RH 主要通过 PAR 和 T_a 对 P_n 进行作用。

2.3.2 决策系数分析

由表 2 中的决策系数可知,不同生育期影响榆树 P_n 的生态因子和生理因子决策系数排序为:7 月份为 $R^2_{(PAR)} > R^2_{(G_s-u)} > R^2_{(G_s-l)} > R^2_{(RH)} > R^2_{(T_a)} > R^2_{(C_a)}$, T_a 的决策系数为负值且较小,为主要限制变量。8 月份为 $R^2_{(PAR)} > R^2_{(G_s-u)} > R^2_{(RH)} > R^2_{(T_a)} > R^2_{(G_s-l)} > R^2_{(C_a)}$, RH 的决策系数为负值且较小,为主要限制变量,直接作用较大的 C_a 和 RH (分别为 0.164 和 0.345),通过其他因子对 P_n 的间接作用为负(分别为 -0.019 和 -0.089),大大抵消了 C_a 和 RH 与 P_n 的相关系数(直接作用与间接作用之和为相关系数),从而使 C_a 和 RH 的决策系数为负值。9 月份为 $R^2_{(PAR)} > R^2_{(G_s-u)} > R^2_{(T_a)} > R^2_{(RH)} > R^2_{(C_a)} > R^2_{(G_s-l)}$,各因子的决策系数均为正值,所以均起增进作用。由上述可知不同生育期 PAR 的决策系数均最大为主要决策变量。

表 2 不同生育期榆树净光合速率与生态因子和生理因子间的通径系数和决策系数

Table 2 Path coefficients and decision coefficients between net photosynthetic rate of *Ulmus pumila* and ecological factors and physiological factors at various growth periods

月份 Month	生态因子和 生理因子 ecological factors and physiological factors	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficients						决策系数 Decision coefficient	
				PAR	T_a	C_a	G_s-u	G_s-l	RH		合计
7 月	PAR	0.600	0.594		0.053	-0.006	0.020	0.007	-0.068	0.006	0.360
July	T_a	-0.028	0.123	0.253		-0.007	-0.122	-0.036	-0.237	-0.150	-0.022
	C_a	-0.023	-0.051	0.065	0.018		-0.054	-0.010	0.007	0.027	-0.001
	G_s-u	0.599	0.388	0.030	-0.040	0.007		0.092	0.122	0.212	0.314
	G_s-l	0.596	0.098	0.040	-0.045	0.005	0.365		0.134	0.498	0.107
	RH	0.251	0.284	-0.142	-0.103	-0.001	0.167	0.046	-0.033	0.062	
8 月	PAR	0.740	0.687		0.109	-0.039	0.072	0.013	-0.102	0.053	0.545
August	T_a	0.283	0.195	0.383		-0.057	0.057	0.004	-0.298	0.088	0.072
	C_a	0.023	0.164	-0.162	-0.068		-0.032	-0.003	0.125	-0.14	-0.019
	G_s-u	0.522	0.244	0.204	0.045	-0.021		0.049	0.001	0.278	0.195
	G_s-l	0.473	0.059	0.149	0.012	-0.008	0.202		0.058	0.414	0.052
	RH	0.043	0.345	-0.203	-0.169	0.059	0.001	0.010		-0.302	-0.089
9 月	PAR	0.684	0.557		0.102	-0.065	0.014	0.002	0.075	0.127	0.452
September	T_a	0.574	0.130	0.437		-0.129	0.038	0.005	0.093	0.444	0.132
	C_a	0.254	0.389	-0.094	-0.044		0.030	-0.001	-0.027	-0.135	0.046
	G_s-u	0.404	0.317	0.024	0.016	0.037		0.027	-0.016	0.087	0.156
	G_s-l	0.358	0.029	0.041	0.022	-0.012	0.291		-0.013	0.330	0.020
	RH	-0.471	-0.103	-0.404	-0.118	0.102	0.049	0.004		-0.368	0.086

PAR—光合有效辐射 (Photosynthetically active radiation); T_a —空气温度 (Atmospheric temperature);

C_a —二氧化碳浓度 (Concentration of carbon dioxide); RH —空气相对湿度 (Relative humidity of the air)

G_s-u —上表皮气孔导度 (Upper epidermis stomatal conductance); G_s-l —下表皮气孔导度 (Lower epidermis stomatal conductance)。

2.4 榆树净光合速率与生态因子和生理因子的灰色关联分析

不同分辨系数下榆树净光合速率与生态因子和生理因子间的灰色关联度和关联序列如下表 3。

对 7 月份而言,当分辨系数为 0.1 时,榆树 P_n 与生态因子和生理因子间关联度的大小顺序为 PAR 、 G_s-u 、 G_s-l 、 T_a 、 RH 和 C_a 。通径分析表明, T_a 和 C_a 主要通过 PAR 的间接作用来影响榆树的 P_n ,因此分辨系数为 0.1 时,关联度的大小顺序可认为是 PAR 、 G_s-u 、 G_s-l 和 RH ,这与决策系数分析结果相一致。当分辨系数分别为 0.3 和 0.5 时,榆树 P_n 与生态因子和生理因子间关联度的大小顺序一致,为 G_s-u 、 PAR 、 G_s-l 、 T_a 、 RH 和 C_a 。当分辨

系数为 0.1、0.3、0.5 时,对榆树 P_n 与生态因子和生理因子间关联序进行比较发现,不同的分辨系数对 G_s-l 、 T_a 、 RH 和 C_a 的顺序没有影响,对 PAR 和 G_s-u 的顺序稍有影响,但各因子的总体顺序是相似的,这说明分辨系数 k 具有取值的针对性和情况分析的复杂性。

对 8、9 月份进行分析发现,不同的分辨系数对榆树 P_n 与生态因子和生理因子间的关联序没有影响。8 月份关联度的大小顺序为 PAR 、 G_s-l 、 G_s-u 、 RH 、 T_a 和 C_a , 通径分析表明, G_s-l 主要通过 G_s-u 对榆树 P_n 进行间接作用, 因此关联度的大小顺序可认为是 PAR 、 G_s-u 、 RH 、 T_a 和 C_a , 这与决策系数分析结果相一致。9 月份关联度的大小顺序为 T_a 、 PAR 、 G_s-u 、 G_s-l 、 RH 和 C_a , 通径分析表明, T_a 主要通过 PAR 对榆树 P_n 进行间接作用, G_s-l 主要通过 G_s-u 对榆树 P_n 进行间接作用, RH 主要通过 PAR 和 T_a 对榆树 P_n 进行间接作用, 因此关联度的大小顺序可认为是 PAR 、 G_s-u 和 C_a , 同样与决策系数分析结果相一致。

表 3 不同生育期榆树净光合速率与生态因子和生理因子的灰色关联分析

Table 3 Grey correlation analysis between net photosynthetic rate of *Ulmus pumila* and ecological factors and physiological factors at various growth periods

月份 Month	生态因子和 生理因子 Ecological factors and physiological factors	净光合速率 Net photosynthetic rate					
		关联度 Association coefficient	关联序 Correlation order	关联度 Association coefficient	关联序 Correlation order	关联度 Association coefficient	关联序 Correlation order
			0.1		0.3		0.5
7 月	PAR	0.427	1	0.647	2	0.741	2
July	T_a	0.416	4	0.634	4	0.729	4
	C_a	0.388	6	0.612	6	0.710	6
	G_s-u	0.426	2	0.650	1	0.742	1
	G_s-l	0.420	3	0.642	3	0.740	3
	RH	0.405	5	0.631	5	0.728	5
8 月	PAR	0.465	1	0.683	1	0.770	1
August	T_a	0.411	5	0.635	5	0.733	5
	C_a	0.386	6	0.614	6	0.714	6
	G_s-u	0.429	3	0.655	3	0.749	3
	G_s-l	0.454	2	0.670	2	0.759	2
	RH	0.415	4	0.643	4	0.740	4
9 月	PAR	0.375	2	0.593	2	0.692	2
September	T_a	0.424	1	0.638	1	0.736	1
	C_a	0.213	6	0.439	6	0.535	6
	G_s-u	0.366	3	0.583	3	0.686	3
	G_s-l	0.349	4	0.575	4	0.680	4
	RH	0.329	5	0.556	5	0.665	5

3 结论与讨论

一般条件,植物光合作用日变化均有规律可循,变化曲线呈双峰型或单峰型^[14]。研究表明,不同生育期榆树净光合速率呈双峰型曲线,表现出不同程度的光合“午休”,第一个峰值之后出现低谷,原因为随着气温升高,光合有效辐射增强,高温、强辐射造成榆树叶片蒸腾加剧,叶温升高,气孔部分关闭,气孔导度降低,避免了大量的水分损失,同时气孔部分关闭使 CO_2 吸收量减少,导致光合速率也降低。之后随着光合有效辐射的减弱、气温的降低,气孔导度也随即增大,榆树叶片中 CO_2 吸收量增加,光合速率也增加,因此出现第二个峰值。

光能提供植物碳同化的能量,是植物进行光合作用的基础。植物自然条件下的光合潜力与环境光强呈正

相关。一天之中 PAR 较低时, P_n 随 PAR 的增加而增大, 而当光强过大时 P_n 随 PAR 变化较为缓慢^[15]。不同生育期生态因子和生理因子中 PAR 与榆树 P_n 相关系数最大, 且 PAR 的直接作用大于其他因子的直接或间接作用, 说明 PAR 直接影响榆树的 P_n , 从而影响榆树有机物质的合成与转化, 对榆树生产力起到直接的影响。 G_s-u 与榆树 P_n 呈显著正相关, 其直接作用大于其他因子的间接作用, 且决策系数仅次于 PAR, 说明不同生育期榆树 P_n 主要受 PAR 和 G_s-u 的影响, 其次才是其他因子不同程度的直接或间接影响。

温度与酶活性紧密相关, P_n 对 T_a 敏感性较高^[16], 光合作用关键酶-Rubisco 的最适活化温度为 25—30℃, 其活性的高低直接影响光合速率的大小^[17], 长期高温胁迫可明显降低植物 P_n 、叶绿素含量和光化学效率等^[18], 7 月份 T_a 的平均值为 32.2℃, 最高温度为 36.1℃, 其月均值和最高温度均较大, 造成 T_a 对 P_n 的限制效应。

灰色关联分析表明, 7 月份, 当分辨系数为 0.1、0.3、0.5 时, 榆树 P_n 与生态因子和生理因子间的关联序的总体差异程度微小, 分辨系数为 0.1 时的关联序与相关分析、通径分析和决策系数分析的结果相一致。8、9 月份不同的分辨系数对榆树 P_n 与生态因子和生理因子间的关联序没有影响, 均与决策系数分析结果相一致。同时分辨系数 k 的取值越小, 分辨率越大; k 的取值越大, 分辨率越小, 说明 k 取较小的值能够提高关联度的区分能力, 还可以削弱、抑制异常值对关联度的影响。

综上所述, 不同生育期榆树 P_n 的变化主要受 PAR 和 G_s-u 的影响, 但 PAR 和 G_s-u 对 P_n 的影响不存在简单的线性相关关系, 榆树 P_n 受 PAR 和 G_s-u 影响的同时还受其他因子的综合影响。因此, 探明榆树净光合速率日变化特征与生态因子和生理因子的关系, 对深入揭示其生理特征及优质高产栽培和规范化种植有重要作用。

参考文献 (References):

- [1] 谷文举, 杨慧玲, 杨惠敏, 叶永忠. 浑善达克沙地草地景观要素空间分布关系及其格局分析. 河南科学, 2005, 23(3): 371-374.
- [2] 刘建, 朱选伟, 于飞海, 董鸣, 张淑敏, 王仁卿. 浑善达克沙地榆树疏林生态系统的空间异质性. 环境科学, 2003, 24(4): 29-34.
- [3] 吴新宏. 浑善达克沙地植被快速恢复. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 2003: 2-7.
- [4] 刘果厚, 贾宝丽. 浑善达克沙地榆遗传多样性的研究. 干旱区资源与环境, 2003, 17(5): 123-128.
- [5] 邹学校, 马艳青, 张竹青, 陈文超, 刘荣云, 戴雄泽. 环境因子对辣椒光合与蒸腾特性的影响. 植物资源与环境学报, 2005, 14(4): 15-20.
- [6] 刘振, 董智, 李红丽, 李钢铁. 浑善达克沙地榆树疏林幼苗更新空间格局. 生态学报, 2013, 33(1): 294-301.
- [7] 牛海亮. 浑善达克沙地榆树疏林榆树种群特征分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2008.
- [8] 李永庚, 蒋高明, 高雷明, 牛书丽, 刘美珍, 于顺利, 彭羽. 人为干扰对浑善达克沙地榆树疏林的影响. 植物生态学报, 2003, 27(6): 829-834.
- [9] 刘利, 王赫, 林长存, 王德利, 祝廷成. 松嫩草原榆树疏林对不同干扰的响应. 生态学报, 2012, 32(1): 74-80.
- [10] 敬艳辉, 邢留伟. 通径分析及其应用. 统计教育, 2006, (2): 24-26.
- [11] 高瑞忠, 李凤玲, 于婵, 朱仲元, 朝伦巴根. 浑善达克沙地人工牧草蒸腾光合作用与环境因子的关系分析. 节水灌溉, 2012, (3): 14-18.
- [12] 靳甜甜, 傅伯杰, 刘国华, 胡婵娟, 苏常红, 刘宇. 不同坡位沙棘光合日变化及其主要环境因子. 生态学报, 2011, 31(7): 1783-1793.
- [13] 徐建华. 现代地理学中的数学方法(第2版). 北京: 高等教育出版社, 2002: 338-341.
- [14] 邹琦. 作物抗旱生理生态研究. 济南: 山东科学技术出版社, 1994: 155-163.
- [15] Hoyaux J, Moureaux C, Tourneur D, Bodson B, Aubinet M. Extrapolating gross primary productivity from leaf to canopy scale in a winter wheat crop. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(4): 668-679.
- [16] Xu Q Z, Huang B R. Effects of differential air and soil temperature on carbohydrate metabolism in creeping bentgrass. Crop Science, 2000, 40(5): 1368-1374.
- [17] Salvucci M E, Portis A R Jr, Ogren W L. Light and CO₂ response of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase activation in Arabidopsis leaves. Plant Physiology, 1986, 80(3): 655-659.
- [18] Liu X Z, Huang B R. Photosynthetic acclimation to high temperatures associated with heat tolerance in creeping bentgrass. Journal of Plant Physiology, 2008, 165(18): 1947-1953.